

卒業研究報告

題目

短光パルスのタイミングジッタ抑圧法の研究

指導教員

野中 弘二 助教授

報告者

渡辺 啓太

平成 14 年 2 月 5 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

第 1 章	序論	1
1-1	まえがき.....	1
1-2	研究の目的.....	3
1-3	研究の意義.....	3
1-4	本論文の構成.....	4
第 2 章	実験	5
2-1	短光パルス発生法について	5
2-1-1	自己パルス発振.....	5
2-1-2	モード同期法.....	6
2-1-3	損失スイッチング法.....	8
2-1-4	利得スイッチング法.....	8
2-1-5	提案.....	11
2-1-6	実験調査項目.....	12
2-1-7	実験手順.....	13
2-1-8	定義.....	14
2-2	実験系構成.....	16
2-2-1	実験機器の接続関係.....	16
2-2-2	多重化の概念.....	17
2-2-3	使用機器.....	18
2-2-4	実験条件.....	18

第 3 章 評価結果	20
3-1 帰還タイミングについての調査結果	21
3-1-1 帰還無しの場合	21
3-1-2 帰還有りの場合	22
3-2 偏光方向についての調査結果	23
3-2-1 帰還タイミング悪い場合	23
3-2-2 帰還タイミング良好の場合	24
3-3 考察	25
3-4 パルス幅の測定	30
第 4 章 結論	31
4-1 まとめ	31
4-2 本研究の課題・展開	31
参考文献	33
謝辞	34

第1章 序論

1-1 まえがき

近年の情報化社会の中で通信手段及び扱われるデータも多種多様(インターネットや移動体通信の普及、音声のみから音声+データ通信)となり、通信量が急増している。増加量はインターネットを中心とするデータトラフィックが10倍/年という勢いである。2003年には、90%がデータトラフィックになるという予想もある。前年度から次世代移動通信サービス IMT-2000 も開始され、今後も増加する傾向が見られる。ここ数年でインターネットへの接続でも電話アナログ回線 - ダイアルアップが中心だったのが、高速デジタル回線(例えば Fiber To The Home : FTTH)と常時接続の組み合わせも普及し通信環境は大きく変化している。このエンドユーザの通信量の増加に対応するためのバックボーンネットワークには光通信技術が大きく貢献していることは、周知の事実である。

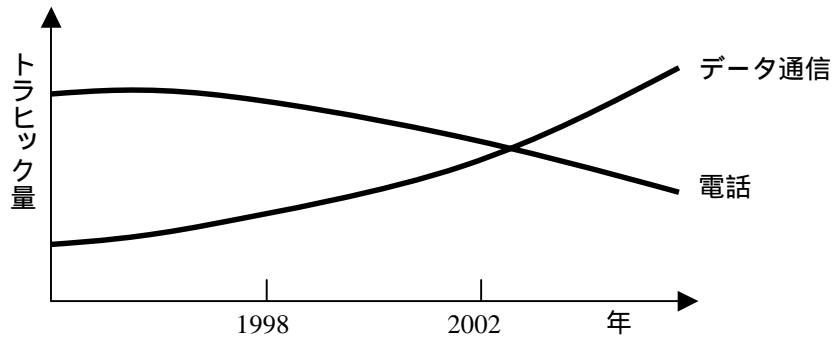


図 1 : 電話・データ通信の通信量[1]

通信量の増加に図 2で見られるように、時分割多重方式 (TDM) や光波長多重方式 (WDM) 等の多重化技術で基幹伝送路を大容量化 (増強) し対応してきた。

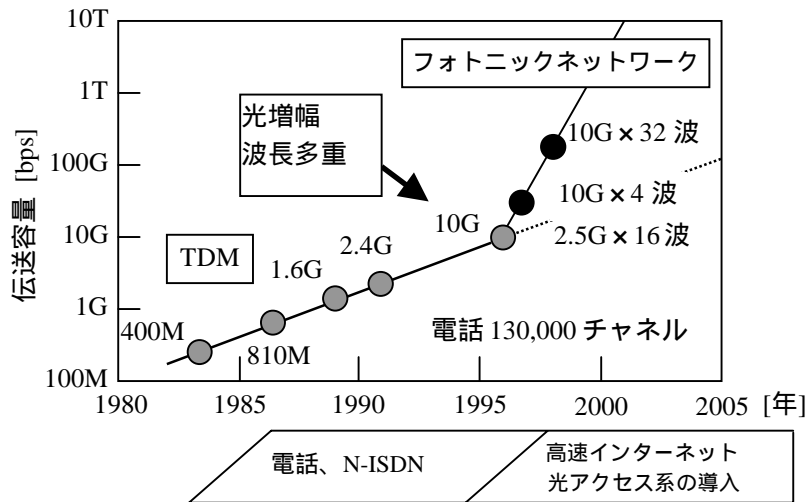


図 2：多重化通信の進展[2]

しかし、今後の急速増加する通信量に対応するためには WDM のような波長帯域の有効利用だけでなく時間領域のさらなる有効利用である光時分割多重方式 (O-TDM) による多重化も重要になってくる。特に超高繰り返し信号列から中程度のビットレートの特定信号を抜き出す (Drop) 又は挿入する (Add)、光 Add-Drop-MUX (ADM) 技術はリング転送ノードの負荷軽減には有効な手段である。

O-TDM で従来の TDM 信号の処理 (時分割多重化回路、同期回路、時分割分離回路、波形観測装置等) を全光化することにより電気的時間の多重の限界 (≤ 40 [Gbit/s]) をはるかに上回る $100 \sim 1$ [Tbit/s] まで超高速化できると考えられている。

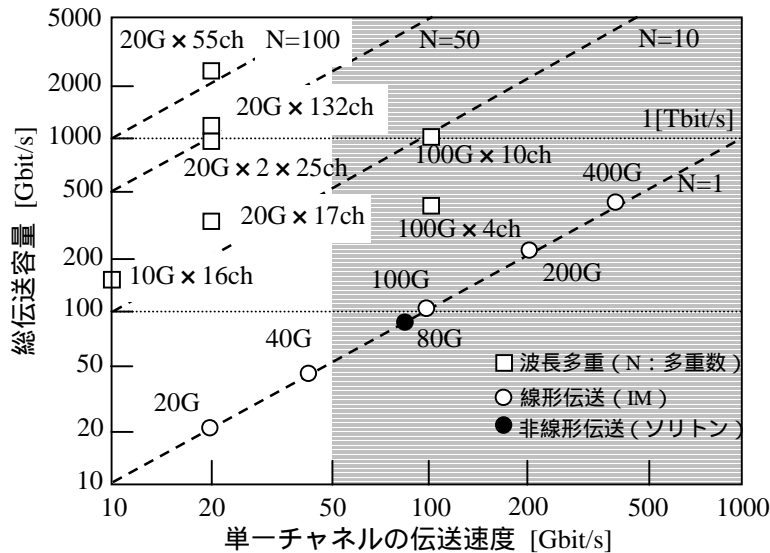


図 3：総伝送容量 - 単一チャネル伝送速度向上[3]

本研究は、単一チャネルあたりの多重度を上げることによって超高速通信を実現する O-TDM・ADM 技術を実現するために必須な光パルス技術を提供することを目的とする研究である。

1-2 研究の目的

O-TDM、特に O-ADM 技術に用いられる光キャリアパルスとしては、効率的に信号を並べるため又は抜き取るための基準となる高品質・高機能な光パルスを生成する事が必須となる。

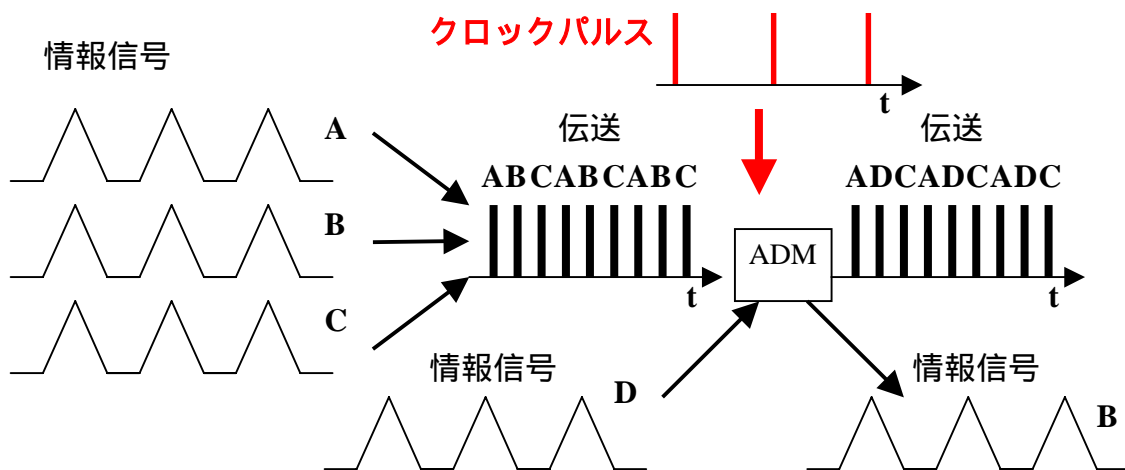


図 4 : O-TDM ネットワーク

高性能な光パルスとは

1. 時間揺らぎ (ジッタ) が少ないこと
2. 繰り返し周期が可変可能なこと
3. パルス幅が細いこと (短パルス幅)

の3つを指す。

本研究の目的は、波長 1.55[μm]帯の DFB レーザを用い、上記の条件のうち特に「ジッタが少ないこと」を重視した、高品質な光パルスを生成する手段を確立することである。

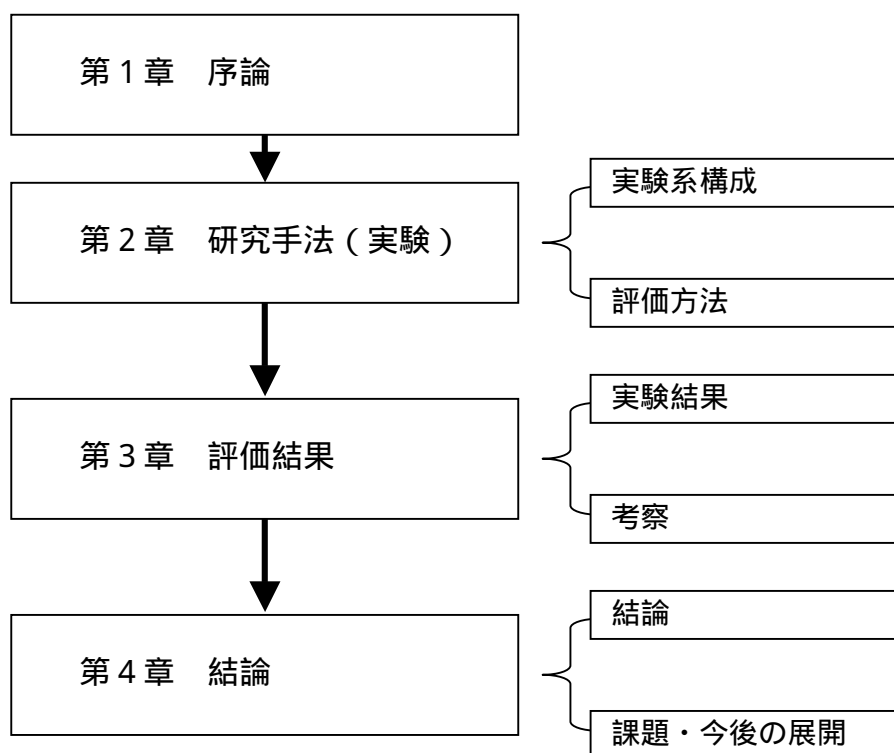
1-3 研究の意義

超高速光通信を実現するには装置の高速化が不可欠であるが、複雑で高速な電気回路制御が必要になると、電気回路の動作速度が伝送速度に影響を与えてしまう。そこで、多重等の処理を主に光で行なうことにより電気系の影響を受けにくくなり超高速光通信が実現可能となる。

目的で述べた条件を満たす光パルスを生成するために、現在さまざまな手法（モード同期 LD、ファイバレーザ、GS-LD）が検討・実験されている。その1つとして利得スイッチング動作による発振でパルスを生成できる半導体レーザ（GS-LD）に着目する。この LD 共振器中に外部より CW 光を注入することによってパルス発振のタイミングを安定化したという報告があった。[4]この報告についての詳細は次章で記述するが、LD 共振器内に注入する CW 光を発生させる光源には高性能な波長可変光源を用いている。この光源は波長精度を必要とし非常に高価なものであり実用化の際にコスト面で不利になると考えられる。本研究は安価な部品及び光のみで、ジッタを抑圧した光パルスを生成することを狙う。本研究の成果を利用することにより超高速通信システムやその評価装置の低コスト化に貢献できる。

1-4 本論文の構成

第1章であらまし、目的，特徴を述べた。
第2章では、実験系の構成及び調査内容を述べ、第3章で実験の結果及び研究考察、第4章で調査から得た結論及び今後の展開・課題を述べるという構成である。



以上の流れで本研究の報告を行なう。

第2章 実験

2-1 短光パルス発生法について

短光パルスの発生法には、以下のものがある。

1. モード同期法
2. 損失スイッチング法 (Qスイッチング)
3. 利得スイッチング法

2-1-1 自己パルス発振

レーザ発振はレート方程式によって解析することができる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{N}{\tau_s} - aN \cdot S \quad \text{式 1}$$

$$\frac{dS}{dt} = aN \cdot S + \beta_{sp} \frac{N}{\tau_s} - \frac{S}{\tau_{ph}} \quad \text{式 2}$$

このレート方程式の時間によらない定常解が Constant Wave Laser Oscillation (CW - 発振) である。しかし、非発光結晶部や可飽和吸収により均一な光子寿命 τ_{ph} やキャリア寿命 τ_s と注入電流量の条件によっては、定常解は得られず、周期的に発振の停止を繰り返す解が得られる。これは、現象的にはパルス発振となる。

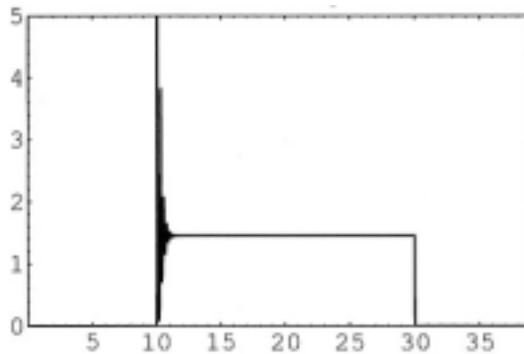


図 5 : 発振波形

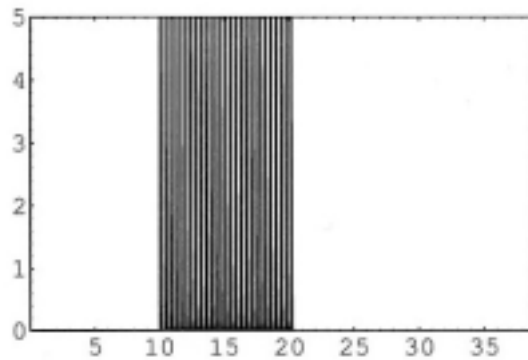


図 6：パルセーション波形

図 5のように、ステップ型の電流に対しても通常の LD は安定して CW 発振している。しかし、キャリア寿命光子寿命の値によっては、図 6で示すように、注入エネルギーが一定でも発振、停止を繰り返す（パルセーション）を起こす。

2-1-2 モード同期法

モード同期とは、発振するモード間位相がランダムではなく、互いに位相が共調しながら発振することによって、一定の繰り返し周期のタイミングに高いピークパワーで非常に細い時間幅の光パルスが発生する現象である。例えば色素レーザーでは、モード同期及び圧縮によって、6[fs]の短光パルスが得られている。[7] 共振器の縦モード間隔は、共振器の周回時間 T_R のほぼ逆数の周波数間隔で存在する。もし、 N 個のモード間隔 の各モードが互いに一定の位相関係を持っていれば、その合成出力はフーリエ変換の関係から、間隔 T_R で幅約 T_R / N のパルス列となる。このようにレーザー発振のモード間の位相を一定にして光短パルスを生じさせる方法である。

半導体のレーザーには 2 種類のモード同期発生法が試みられている。1 つは能動モード同期であり、周波数 f_M の電流変調により周期的に利得を持たせる方法と、受動モード同期で光強度の増大により損失が減少する可飽和吸収体を用いるものである。

半導体レーザーでは、共振器の大きさが超小型なことや発振波長における材料分散が大きいことから、素子単体による高品質のモード同期は難しく、外部共振器を構成する手法が一般的となっている。

能動モード同期

光パルスの繰り返しと同じ周期で利得が変化し、利得のピークでしきい値をわずかに超える。このためパルスが利得媒質中を通過するたびに、パルスの中心部は両裾より大きな利得を見ることがなり、このため共振器内を繰り返し往復するパルスが変調を受けるたびに鋭くなる。均一な広がりを持つ利得媒質中で、パルスの形をガウス型にすると、その幅は

$$\Delta t \approx \frac{1}{4\sqrt{M} \sqrt{f_M \Delta v_{BW}}} \quad \text{式 3}$$

M : 変調振幅、 f_M : 変調周波数、 Δv_{BW} : 系の周波数帯域

パルス幅はバンド幅の平方根に比例する。

受動モード同期

レーザ活性媒質内や近傍に存在するか、または人工的に導入した局所的な非発光再結合領域、あるいは電子の深いトラップ順位等を可飽和吸収媒質として用いる。可飽和吸収媒質の回復時間が発生するパルス幅に対して長いか短いかに対応し、可飽和吸収媒質が“遅い”または“速い”といい、この関係によってモード同期のプロセスが異なる。

速い可飽和吸収媒体では、光パルスの入射によって損失が減少し、利得の窓が開くが、光パルスが通り過ぎると直ちに窓が閉まることになる。したがって光パルスそのものにより窓の開閉が行なわれ、均一に広がった系のパルス波形は時間幅 t と周波数幅の関係がトランスフォームリミット (TL) な関係に従う理想的なパルスとなり、その幅 t は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta v_{BW} \sqrt{\left(\frac{q}{2g}\right) \left(\frac{P_p}{P_A}\right)}} \quad \text{式 4}$$

P_p : パルスのピークパワー、 P_A : 吸収媒質の飽和パワー、 q : 吸収媒質の非飽和時の損失、 g : 飽和利得、パルス幅 (Δt) はバンド幅 (Δv_{BW}) の逆数に比例

遅い可飽和吸収媒体(パルス幅に比べて吸収媒体の緩和時間がずっと長い)では、利得と吸収媒体の飽和の振る舞いを考慮する必要がある。光パルスが媒体中に入ると、利得及び吸収は減少し、パルスが通り過ぎた後でゆっくり元の状態に戻る。この場合に、吸収が損失を上回る利得の窓が光パルス自身により開き、光パルスの先鋭化が生じる。この結果モード同期が完全に実現すれば、そのパルス波形はやはり

$\sec h^2\left(\frac{t}{\Delta t}\right)$ となり、その幅は次式で与えられる。(以上[1]、[7]より)

$$\Delta t = \frac{4}{\Delta\nu_{BW} \sqrt{q\left(\frac{E_0}{E_A}\right)}} \quad \text{式 5}$$

E_0 : パルスのエネルギー、 E_A : 吸収媒質の飽和エネルギー
パルスエネルギーに反比例してパルス幅は狭くなる。

2-1-3 損失スイッチング法

適当な損失制御素子を光共振器内に設けて共振器内の損失を高速にスイッチすることにより、他のレーザと同様に半導体レーザにおいても Q スwitching 動作が可能であり、時間幅が短く、ピーク出力の大きな光パルスが得られる。得に半導体レーザの能動 Q スwitching では、共振器内の光子の寿命がピコ秒オーダーと極端に短いことから、Q スwitching 動作によっても利得スイッチング法と同様、数十ピコ秒のパルス幅を持つ光出力を発生することができる。

光共振器の Q 値の制御には、高速な光スイッチング素子の使用とともに、媒質の非線形な吸収飽和現象を利用した過飽和吸収体による光スイッチングも用いられる。前者を能動 Q スwitching、後者を受動 Q スwitching と呼ぶ。活性領域内にある欠陥や不均一な構造により、受動 Q スwitching によるパルス発振が観測されるが、一般に温度条件や励起の条件、構造などに大きく依存する。半導体レーザの一部に非励起の部分の設けたり、逆バイアスをかけ、過飽和吸収特性をもたせて受動 Q スwitching を実現する方法も有効である。

パルス幅約 50[ps]で繰り返し ~ [MHz]でのピーク出力では CW 動作時の約 100 程度が見込まれている。

2-1-4 利得スイッチング法

高周波変調法

注入電流の変化に遅れてキャリア数、すなわち利得が増大して、利得がある程度超えた時点で発振を開始する。光子及びキャリアの寿命が短いことから、発振によって短時間にキャリアの急激な現象を生じ、すぐに発振を停止し、短光パルスが発生することになる。発振停止後も励起が継続していれば、発振によるキャリア消費がないため、再び緩やかに利得が増大し、損失を上回るようになる。すると再び急峻な光パルスが発生する、いわゆる緩和振動を生ずる。したがって、1 変調中に第 2 周期目のパルス発生しないように励起をコントロールすることにより、変調周期

に対応した光パルス列を発生できる。このことから利得スイッチングによる短光パルス発生は、励起電流の急峻な変化により生ずる緩和振動の第1周期目のパルスのみを切り出す方法であるということが出来る。

変調電流による半導体レーザのキャリア密度及び光出力の変化を図 7に示す。

[7]

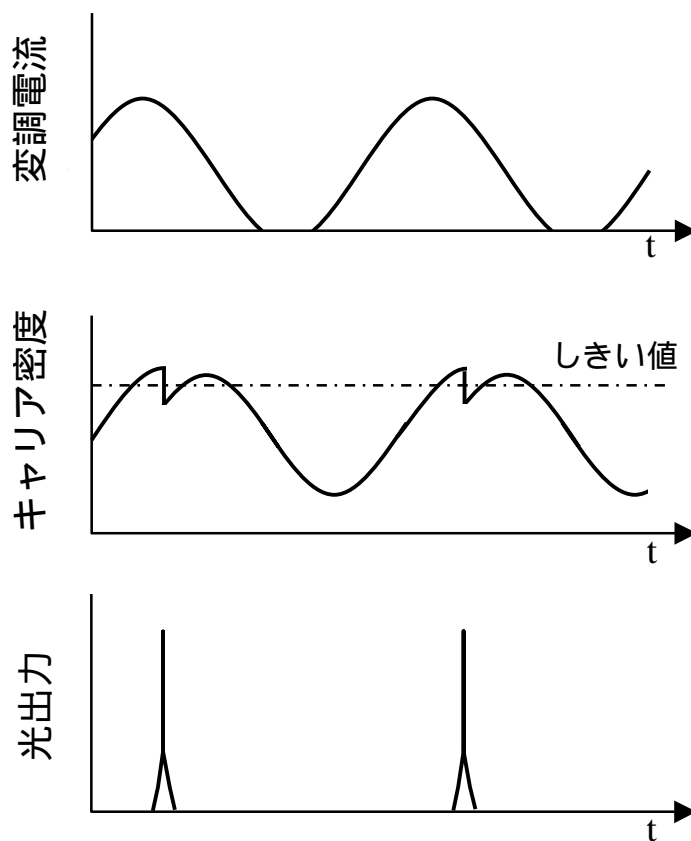


図 7 : 利得スイッチング原理図

本研究も研究報告と同様の利得スイッチング法により短光パルスを発生させている。他の短光パルス発生法との主な違いを表 1に示す。

表 1：半導体レーザからの超短光パルスの発生方法と特徴

発生方法		特徴
利得スイッチング	短電流パルス 高周波変調	動作方法が簡便 繰り返し周波数が可変 タイミング揺らぎが大きい
損失スイッチング (Qスイッチング) 自己パルセーション	能動 受動	ピーク出力が大きい 素子製作が容易でない*1 動作制御が容易でない*2
モード同期	能動 受動	コヒーレントなパルス発生可 共振器変更・調整難 (外部共振器が必要) 理論限界 TL に近い短パルス幅*2

*1：主に能動動作 *2：主に受動動作

以上の違いを踏まえ、本研究の目標・意義でも述べた「短パルス幅・繰り返し周期可変な」光パルスを発生させる方法として、利得スイッチングを用いることとした。

2-1-5 提案

強い高周波変調時にも単一縦モードの得られる半導体レーザ、例えば DFB、DBR 構造の半導体レーザを用いた場合、利得スイッチング法による短光パルス発生でも、ノイズスパイク列のないコヒーレントな超短光パルスが発生できる。しかしゆるやかな電気変調でキャリア密度を発振しきい値以上に引上げ、鋭い立ち上がりのパルス発振をおこなうため、立ち上がりタイミングの揺らぎが ~ 10 [ps]程度と大きく、課題であった。

他の研究機関の研究報告[4]

利得スイッチングを利用したレーザに CW 光を注入することでタイミングジッタが低減した。タイミングジッタが最低となる時、注入していた CW 光は、光パルスの中心波長 1556.7[nm]に対して約 1[nm]短い波長で、-17[dBm]の光強度であった。結果として最大で約 1/5 ほどタイミングジッタを低減させることに成功した。

この報告は、LD に外部から光を注入することによってジッタを抑圧できることを指示している。本研究では、研究報告と同様の抑圧効果を得られる簡便な方法を提案し、実測にて調査を行なう。

本提案の効果の有無を確認するために次節で述べる項目を実験的に調査する必要がある。

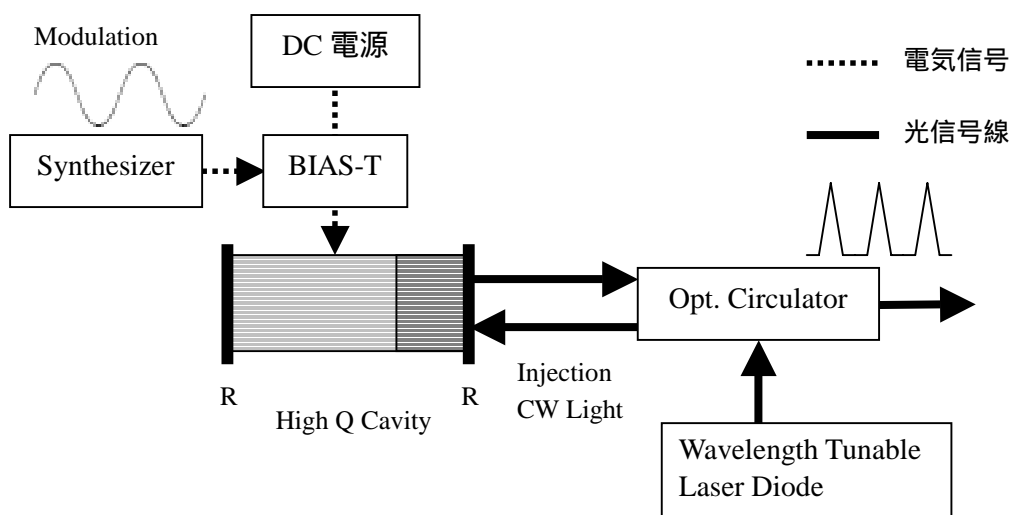


図 8 : CW 光注入によるジッタ抑圧システム

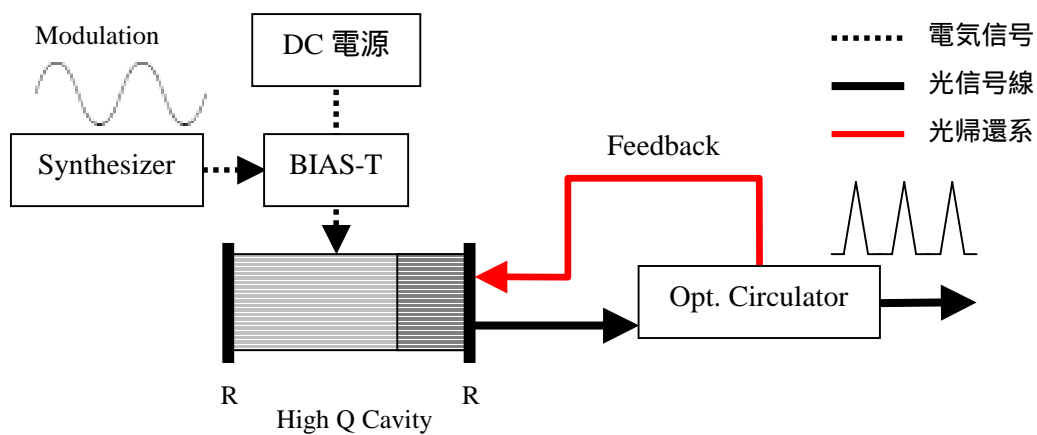


図 9：提案する自己光パルス帰還法によるジッタ抑圧システム構成

2-1-6 実験調査項目

LD から発生させた光パルスをジッタ抑圧部に通すことにより、どの程度ジッタが抑圧されるのか（効果の有無）、またジッタ抑圧に効果がある条件や範囲を調査する。

条件とは、

帰還タイミング

偏光方向

帰還光パワー

の 3 つである。

今回の研究では、このうち 2 つ（帰還タイミング、偏光方向）に着目し、動パラメータを変化させパルス品質を評価することによってジッタ抑圧効果について調査を行なう。

2-1-7 実験手順

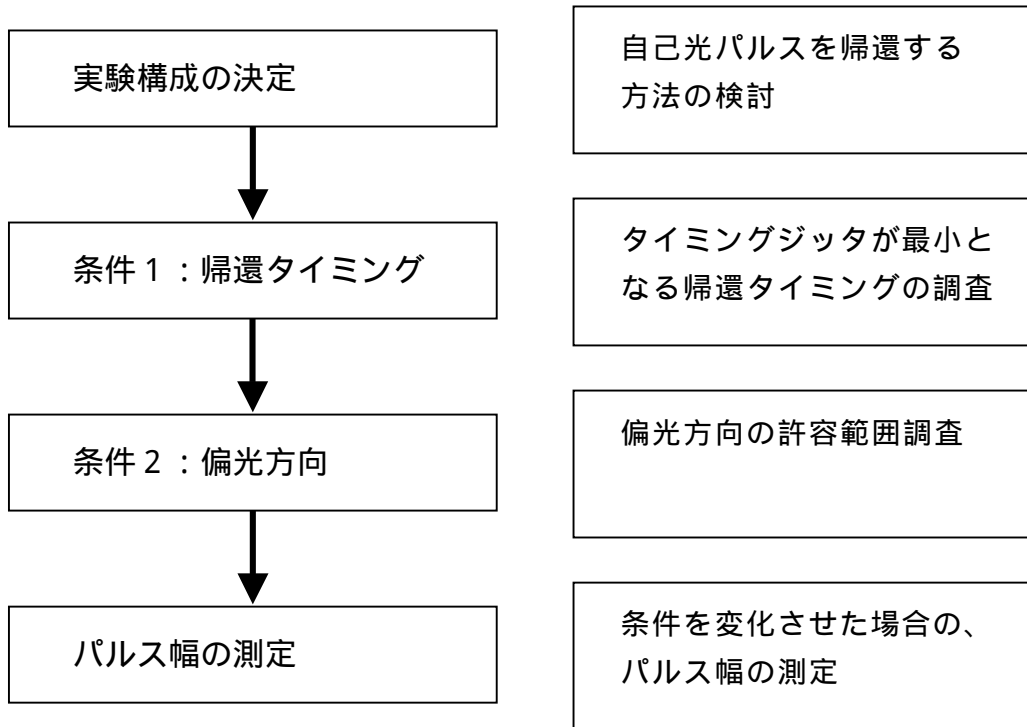


図 10：実験の流れ

まず本研究では、低ジッタの光を生成するために自己パルスを帰還する方法を検討した。帰還する方法には、図 11、図 12の 2 種類考えられる。

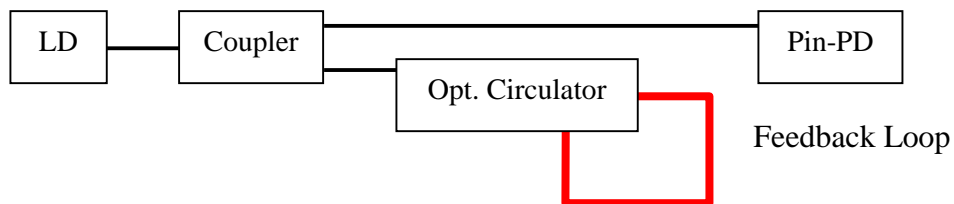


図 11：帰還構成 1

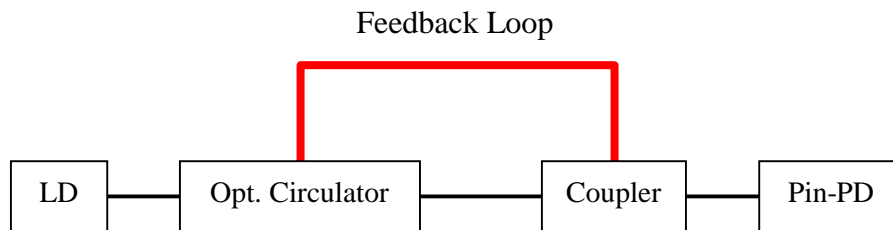


図 12：帰還構成 2

Opt. Circulator : 光サーキュレータ

図 13に示す光を 1 方向にしか通過させない装置
左側からの入射光は右方向にだけ通過
右側からの入射光は上方向にだけ通過
上側からの入射光は左方向にだけ通過

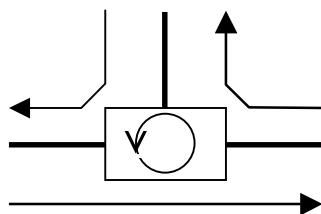


図 13 : 光サーキュレータ

図 11で示される方法では、PD からの反射光が影響して安定した実験結果が得られなかった。図 12で示される方法では、光サーキュレータによって反射光が LD に戻らないのでこちらの構成を使用することにした。

図 14の Feedback と書かれているのが、自己光パルスを帰還するポイントである。このポイントを時間軸[t]上を前後させることにより、ジッタを抑圧できる範囲を調査する。また、偏光方向の依存性及びパルス幅も平行して調査する。

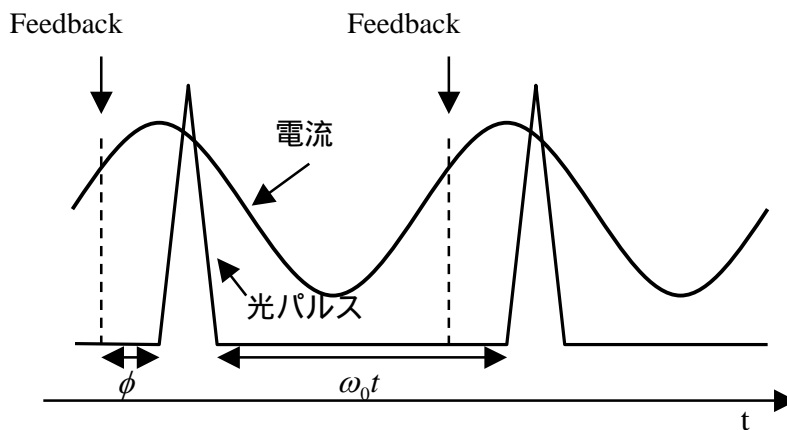


図 14 : 自己光パルス帰還

2-1-8 定義

本研究の測定データで、ジッタと呼んでいるものはパルス計測画像を積分して立上りと立下りのタイミングばらつき分布を表示したヒストグラムの半値幅 (t) である。(図 15を参照)したがって、正式な測定法(測定装置)によるものではない。

タイミングジッタを定量的に測定するには、各周波数の時間揺らぎ量 (U.I.pp[Hz]) を積分すべきである。

本研究では、オシロスコープによるパルス幅の半値幅を時間揺らぎ量としてジッタ幅の測定を行なった。

本来ならば専用の測定機器 (ジッタアナライザ) を使用し測定すべきだが、機器がないため今回の研究ではサンプリングオシロスコープで表示するパルスの立上りと立下りのタイミングばらつき分布 (ヒストグラム) の半値幅で代用した。

ただし、光パルス幅の実測値には計測機器による影響も含まれている。なお、ヒストグラムとは、頻度分布のことである。

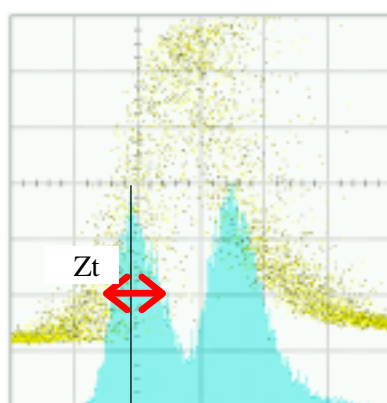


図 15 : ヒストグラム

帰還タイミングを変化させるとは、自己光パルスの遅延時間を変化させることである。本実験では、図 16に示す Feedback Loop 部分を長さの異なる光ファイバの組み合わせにより配線長を変化させ実現している。変化量は配線長 970 ~ 2181[mm]、時間的には 6[ps]程度変化させていることになる。偏光方向は、Polarization Controller (偏光コントローラ：偏光方向を変化させる装置) によって、 $\pi/2$ 、 $\pi/4$ を変化させることができる。

$\pi/2$ 位相板：直線偏光方向を回転させる光部品

$\pi/4$ 位相板：偏光の楕円率を調整する光部品

2-2 実験系構成

本研究の提案は、LD を利得スイッチング法により光パルスを発生させ、自己光パルスを帰還させる構成にある。

緩やかに増加しつつあるキャリア密度が発振しきい値より少し前の状態にあるとき、外部から光パルスを入射する（本実験では、自己光パルスを帰還する）ことによって反転分布状態にキャリアの一部を故意に誘導放出をさせ、キャリア密度の増加の傾きを急激になるように操作する。傾きが急激であれば利得スイッチングのタイミングずれが小さくなるため、タイミングジッタも減少するためである。

2-2-1 実験機器の接続関係

図 16に示す光パルス帰還装置（ジッタ抑圧部）が、提案した光パルスを帰還する部分であり、本研究の最大の特徴である。

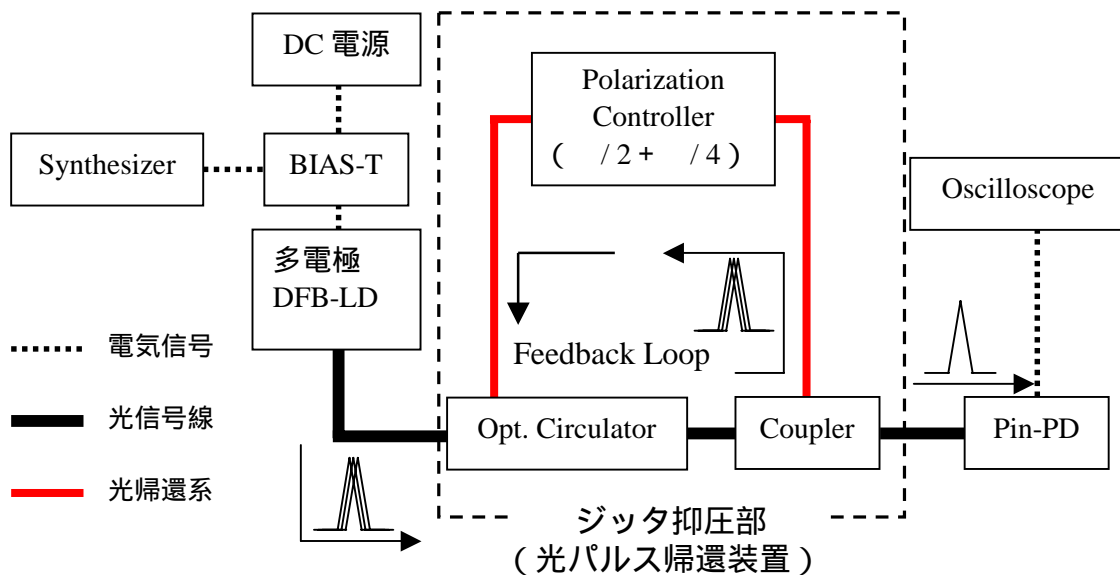


図 16：実験機器接続図

2-2-2 多重化の概念

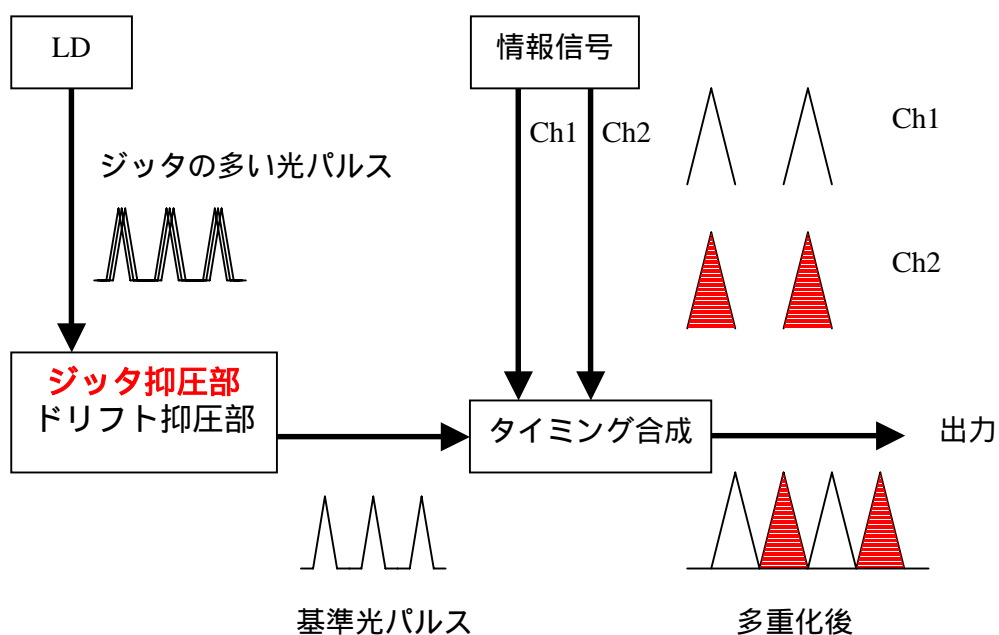


図 17：多重化時の概念

コード化した情報信号を乗せる（多重化する）のは、図 17に示すように光パルスのジッタを抑圧した後であり自己光パルスを帰還することによる情報信号へ影響はない。

2-2-3 使用機器

提案した実験系で測定するための使用機器を表 2に示す。

表 2：実験使用機器

光パルス発生系

名称	メーカー	型番
LD		多電極 DFB-LD
DC 電源		SEC-130
BIAS-TEE	Anritsu	A3N1015
ローパスフィルタ	TAMAGAWA ELECTRONICS	BESSEL THOMSON ULF-170
シンセサイザ	HEWLETT PACKRD	83712A

光パルス測定系

名称	メーカー	型番
PD	NEL JAPAN	KEPD2535VPG
BIAS-TEE	NEL JAPAN	Wiltron
サンプリングオシロスコープ	Agilent	infinium DCA 86100A/86112A[Plag-in]
光パワーメータ	ADVANTEST	TQ8210 / TQ82015[PD]
光パルス帰還装置		分波器 SUMICEM SC-1550 [PD]
光サーキュレータ		PICT-1550-S
光ファイバアンプ	FITEL	ErFA125
フィルタ	KOSHIN KOGAKU	TFCM-1560CW-SS

2-2-4 実験条件

室温 22 ~ 25[]

変調周波数 2.3426[GHz]

Feedback Loop 配線長 970 ~ 2181[mm] 但し測定ごとの配線長の変化分は離散的で一定ではない。

変調周波数は、前年の実験[6]にてパルス幅が細かった周波数だったため継続して使用していた。今回、周辺の電流・周波数をパラメータとして発生パルス幅の調査を行い(図 18参照) 妥当性が確認された。

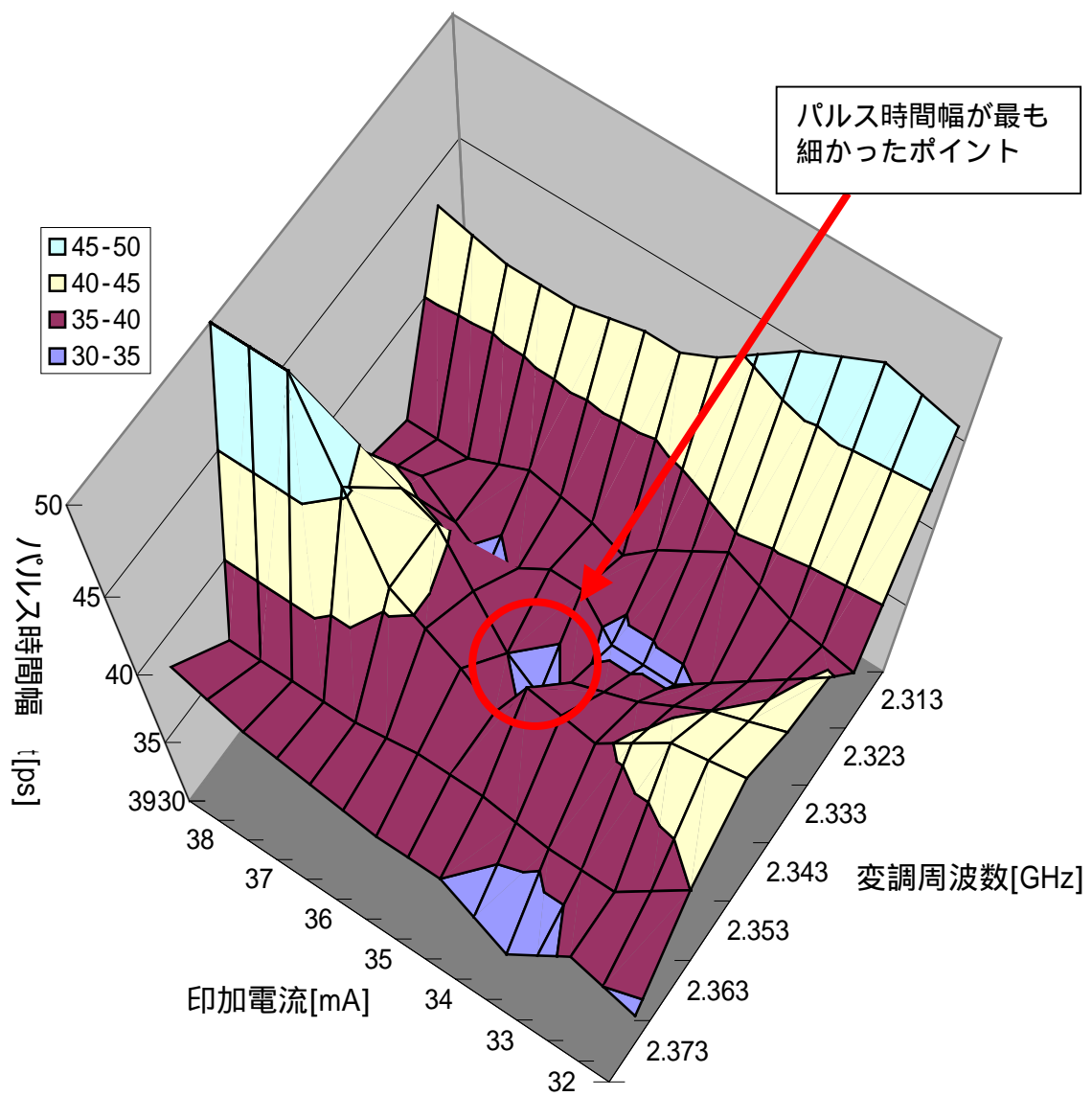


図 18 : 変調周波数 - 印加電流を変化させた場合のパルス幅

第3章 評価結果

提案した実験系でのジッタ抑圧効果の有無及び範囲等を調査するために、表 3 に示す調査内容で実験を行なった。

表 3：調査内容

調査名	条件	図番号
帰還影響調査	帰還無し	図 19
	帰還有り(帰還タイミング良好)	図 20
	帰還有り(帰還タイミング悪い)	図 21
偏光方向調査	帰還タイミング悪い	図 22
	帰還タイミング・偏光方向とも悪い	図 23
	帰還タイミング・偏光方向ともに良好	図 24
	偏光方向のみ悪い	図 25
パルス幅調査	帰還タイミング、偏光方向を変化	図 32

帰還影響調査を行なう際には、偏光方向はすべて(帰還無しの場合を除く)良好な状態に調整している。

また、偏光方向影響調査時の帰還タイミング良好・悪いという状態は、帰還影響調査測定中に一番良好・悪い光パルス波形が得られた状態の帰還タイミング(配線長・遅延時間)である。

3-1 帰還タイミングについての調査結果

長さの異なる光ファイバを組み合わせにより帰還タイミングを変化させ、各測定点においてヒストグラムを採取した。

3-1-1 帰還無しの場合

光帰還無しの状態（図 16に示す Feedback Loop の部分はずした状態）で測定を行なった。この条件で測定した、サンプリングオシロスコープによるパルス波形を図 19に示す。

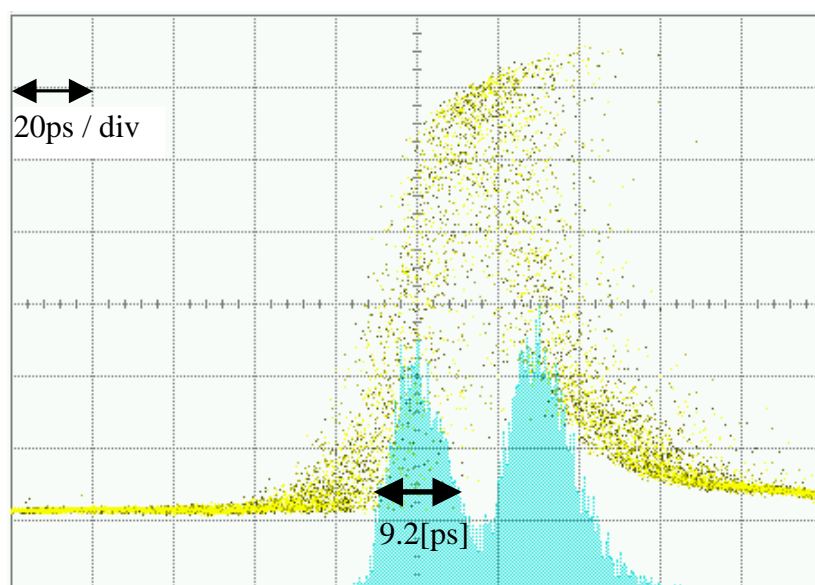


図 19：帰還無し

3-1-2 帰還有りの場合

帰還タイミングを変化させ、(偏光方向はジッタ最小状態になるように選択)測定した。良好な光パルスの状態の波形を図 20に示す。ジッタは 1.7[ps]であった。良好な状態とは、ジッタが最小の状態のことである。

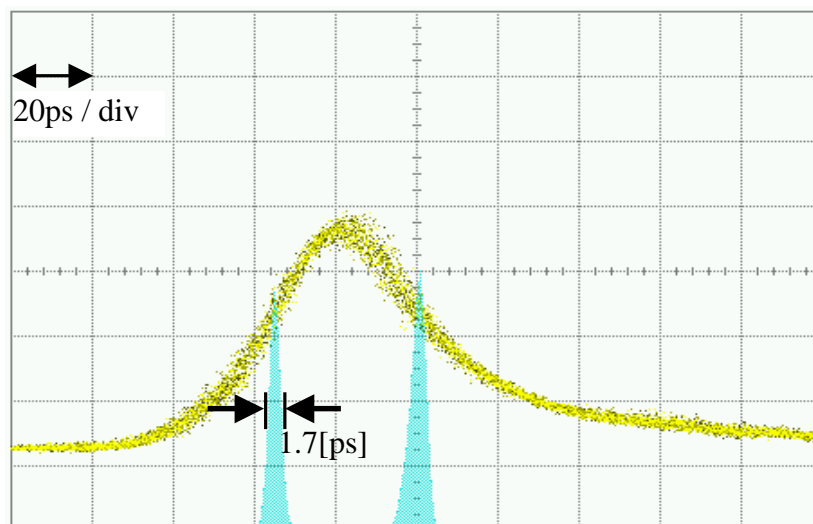


図 20 : パルス光帰還有り

測定結果より発生した光パルス自身を、条件を調整して帰還することによりジッタが抑圧できることは確認できた。ただし、帰還をすればいかなる条件でも良好な光パルスが得られるわけではなく、帰還タイミングによっては帰還無しの場合とジッタが同じ 9.2[ps]以上(帰還の有無であまり変化がない又はむしろ悪化する)場合も存在した。図 21を参照。このタイミングの変化による効果を整理し 25 ページにグラフをまとめて考察する。

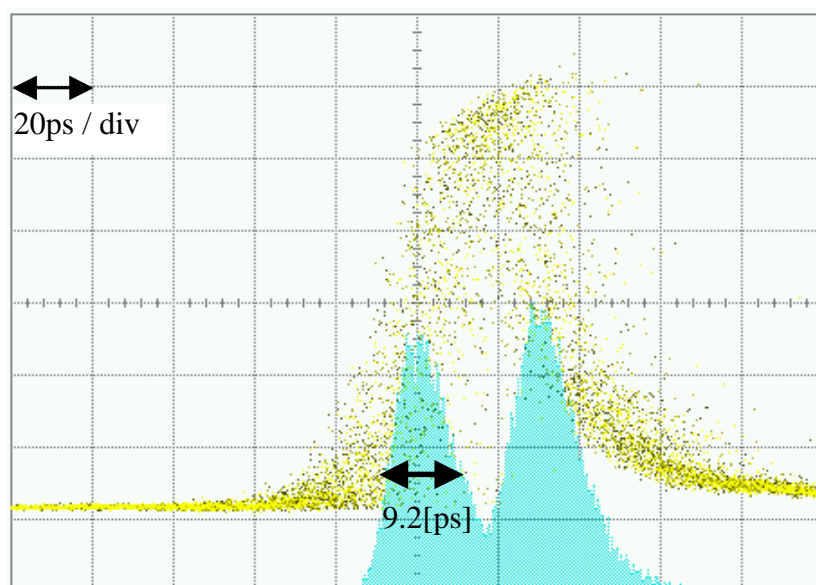


図 21 : パルス光帰還効果小の場合

3-2 偏光方向についての調査結果

偏光コントローラを操作することにより、ジッタ抑圧効果に対する帰還光の偏光方向の影響を調査した。調査は、帰還タイミングの調査時に一番ジッタ抑圧効果が悪かった所と良好な所の2箇所において測定した。結果を図 22～図 25に示す。

3-2-1 帰還タイミング悪い場合

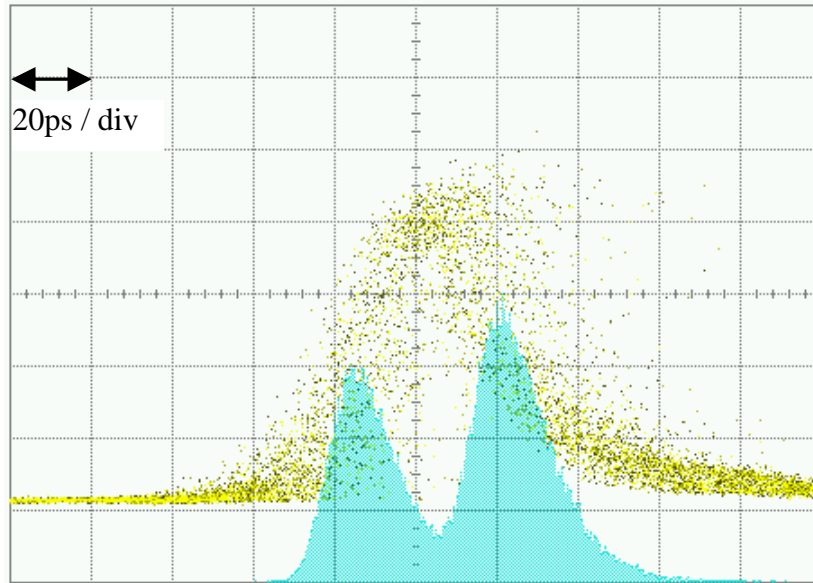


図 22 : 光帰還タイミングのみ悪い場合

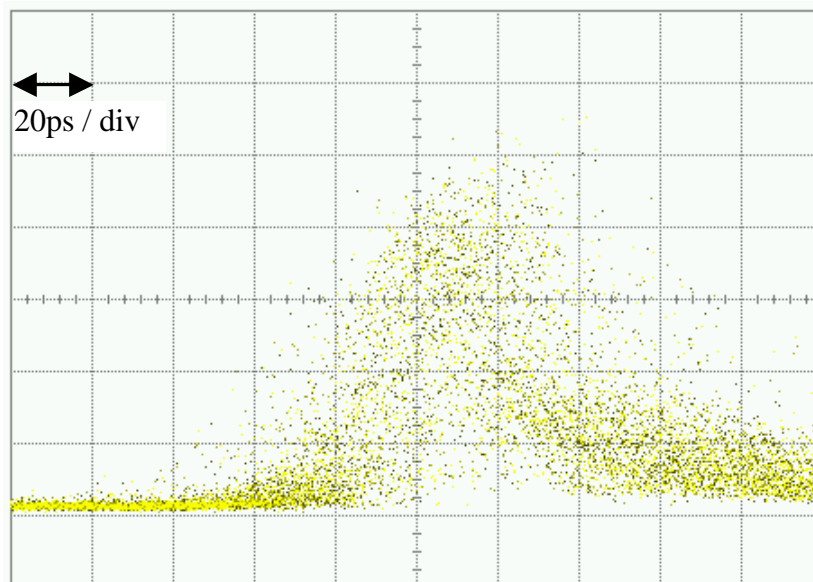


図 23 : 光帰還タイミング、偏光方向共に悪い場合

帰還タイミングが悪い場合（図 22、図 23）では、偏光方向の影響をあまり受けていない。

3-2-2 帰還タイミング良好の場合

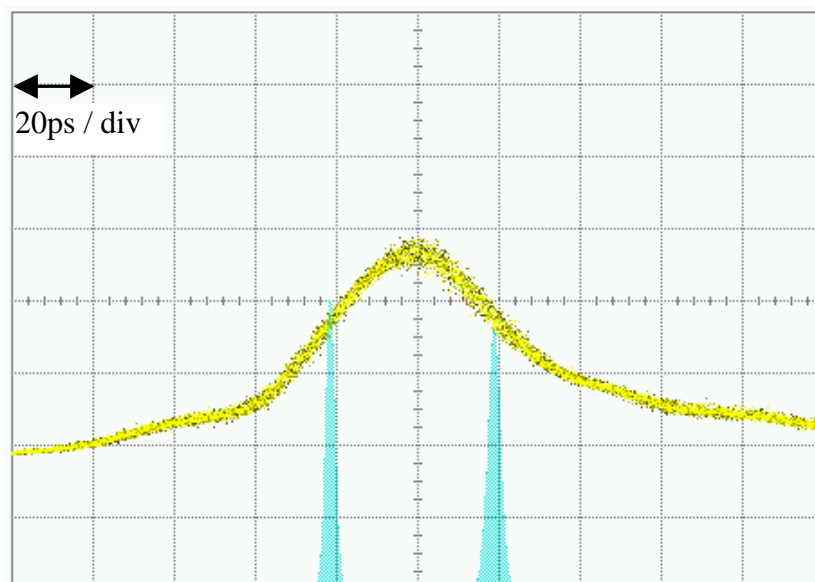


図 24：帰還タイミング、偏光方向共に良好の場合

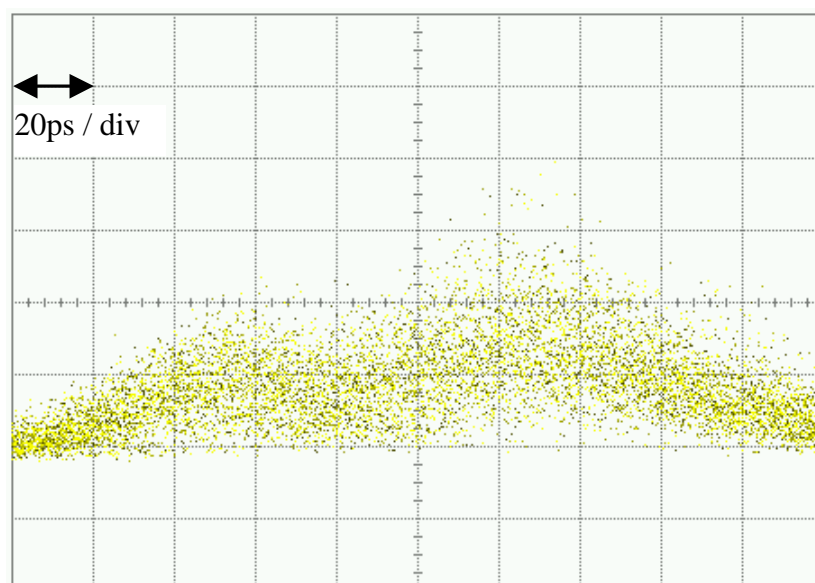


図 25：偏光方向のみ悪い

偏光方向良好な場合（図 24）は非常にジッタの抑圧された光パルスが測定された。一方、偏光がずれた場合（図 25）は光パルスが判別できない。

図 22～図 25の4つの図から得られる知見として、偏光の不一致は発振の不安定化を誘発するが、タイミング良好な場合にはその悪影響は顕著となる。しかし、タイミングがずれている場合、元々戻り光の影響が小さいため、不安定化も小さい。

3-3 考察

「3-1帰還タイミングについての調査結果」で測定したのものから、帰還無しの場合 (Non Feedback)、帰還有りで帰還タイミング、偏光方向共に良好の場合 (Good Feedback) の立上り、立下りのジッタ (t) の値を表 4に示す。

表 4：タイミングジッタの帰還による抑圧効果を受ける光パルスのまとめ

	立上り[ps]	立下り[ps]
Non Feedback	9.2	9.2
Good Feedback	1.7	1.3

下に帰還タイミングを変化させた場合 (偏光方向はすべて良好に調節) のグラフを示す。変化範囲は 2049 ~ 2102[mm]である。これはパルス繰り返し周期 2.3426[GHz]から換算すると、帰還パルスは 67.28 ~ 67.44 パルス目の戻りである。

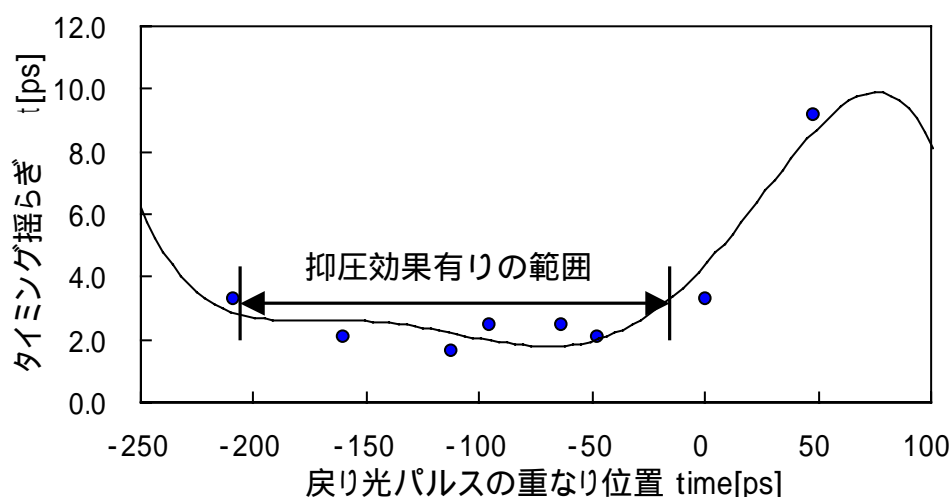


図 26：帰還タイミング - タイミングジッタ

以上の結果から自己光パルスを帰還することによってジッタを抑圧することが確認できた。光パルスを帰還することにより LD の光パルス発振に影響を与えていると言える。また、単純に帰還すれば良好な光パルスを得られるわけではなく、帰還タイミングをある領域内に設定する必要がある。

ジッタ抑圧に効果 (ジッタ 3[ps]程度以下) があつた帰還タイミング範囲は 150 ~ 200[ps]程度と比較的広い範囲であつた。

次ページに、測定範囲を広げ (帰還タイミング変化量を増やした) 配線長 970 ~ 2181[mm]データを採取できなかつたところを合成した図 27を示す。

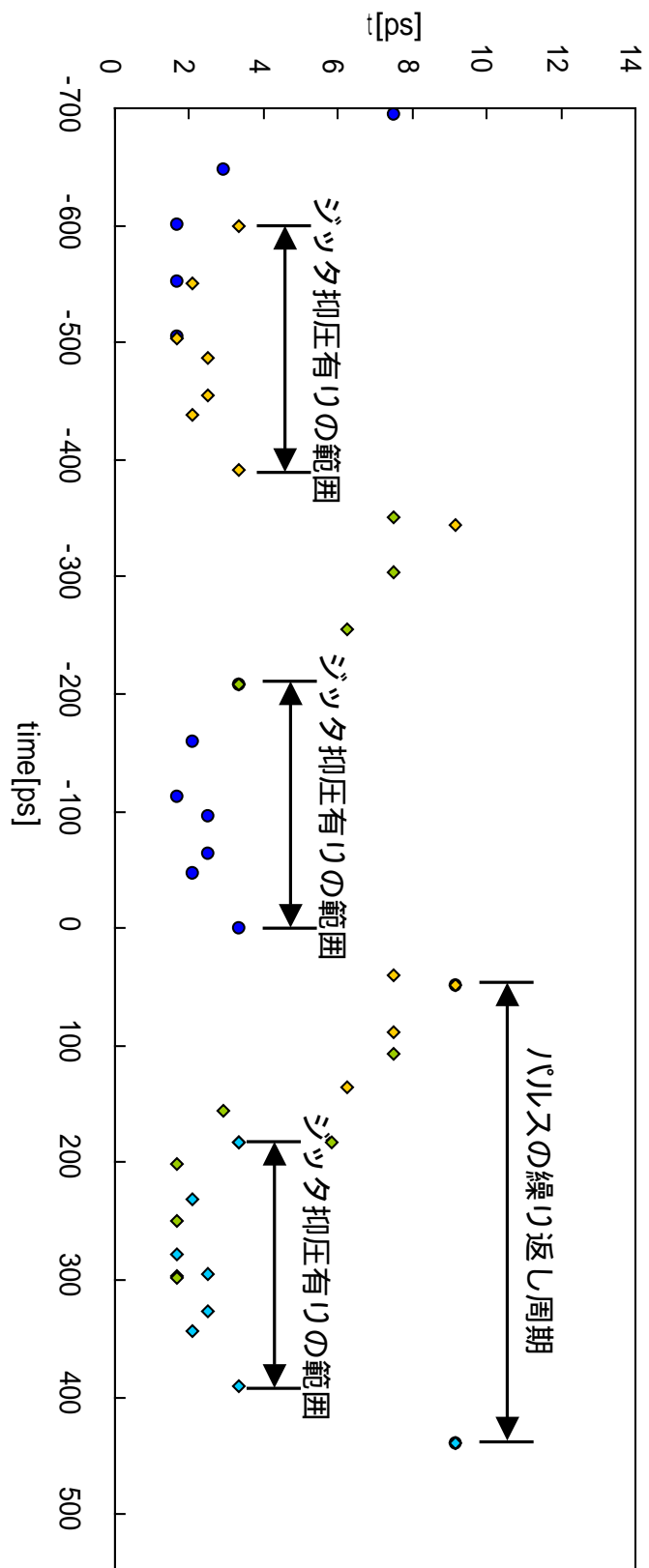


図 27：帰還タイミング - タイミングジッタ（広範囲）の周期性

次に偏光（光電場の偏向角）を変化させた場合（帰還タイミングは良好に調整）の、グラフ（図 28、図 29）を示す。 t が 5[ps]のものは光パルスが判別できない状態（ジッタの悪影響が大きい測定箇所）である。グラフ表示の都合上、5[ps]以上に統一している。帰還タイミング、偏光方向ともに良好なポイントを 0 度とした。

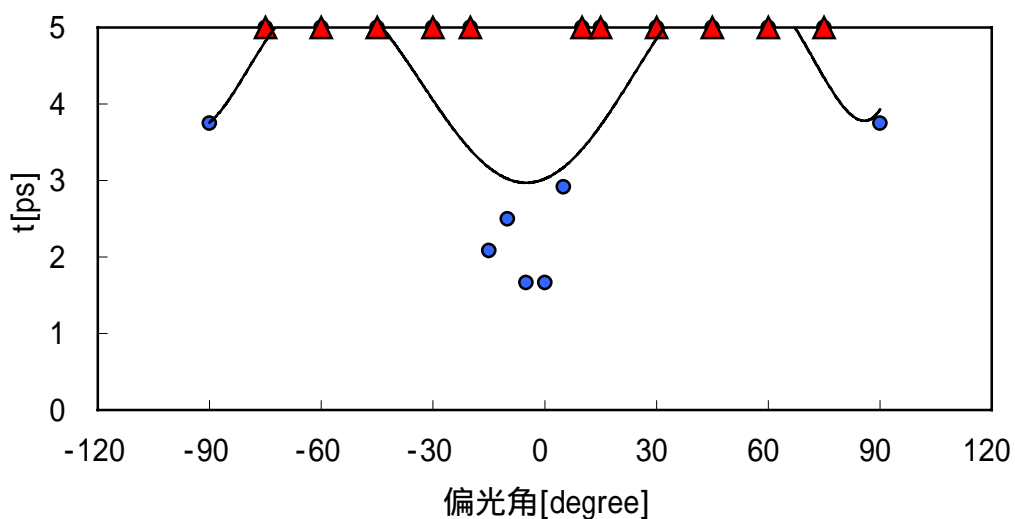


図 28：偏光角 - タイミングジッタ（ /2）

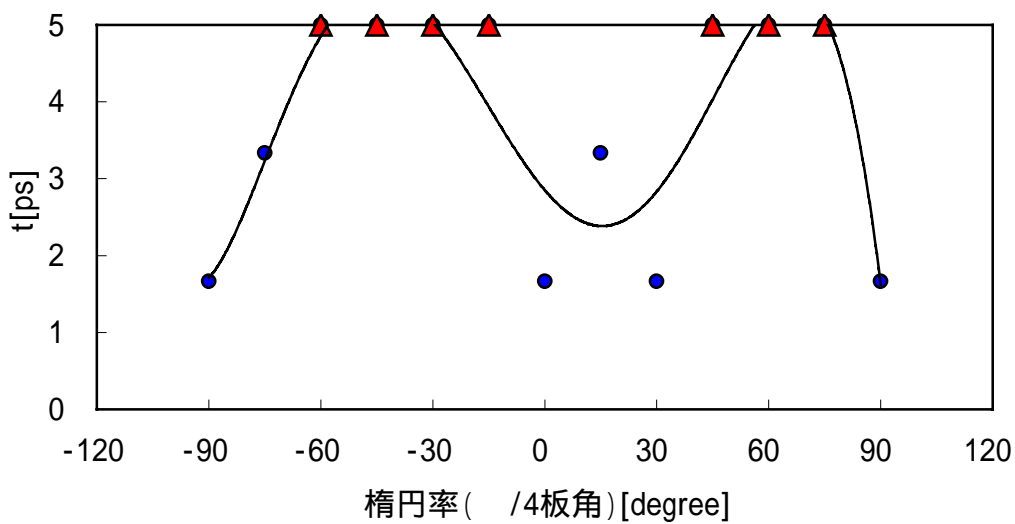


図 29：偏光角 - タイミングジッタ（ /4）

表 5に偏光方向を変化させた場合の、ジッタ (t) の値を示す。 $/2$ 、 $/4$ どちらの場合も、立上り、立下り共に 1.7[ps]であった。

表 5：偏光方向によるジッタ量の変化

	立上り[ps]	立下り[ps]
$/2$	1.7	1.7
$/4$	1.7	1.7

図 28、図 29で示されるように、偏光方向がジッタ抑圧に効果がある範囲は $/2$ 、 $/4$ 共に 30 度程度の範囲であった。

次に偏光角とパルス幅の関係（帰還タイミングは良好）を図 30、図 31に示す。 t が 60[ps]のものは光パルスが判別できない状態（ジッタの悪影響が大きい測定箇所）である。グラフ表示の都合上、60[ps]以上に統一している。グラフでは、帰還タイミング、偏光方向ともに良好なポイントを 0 度とする。

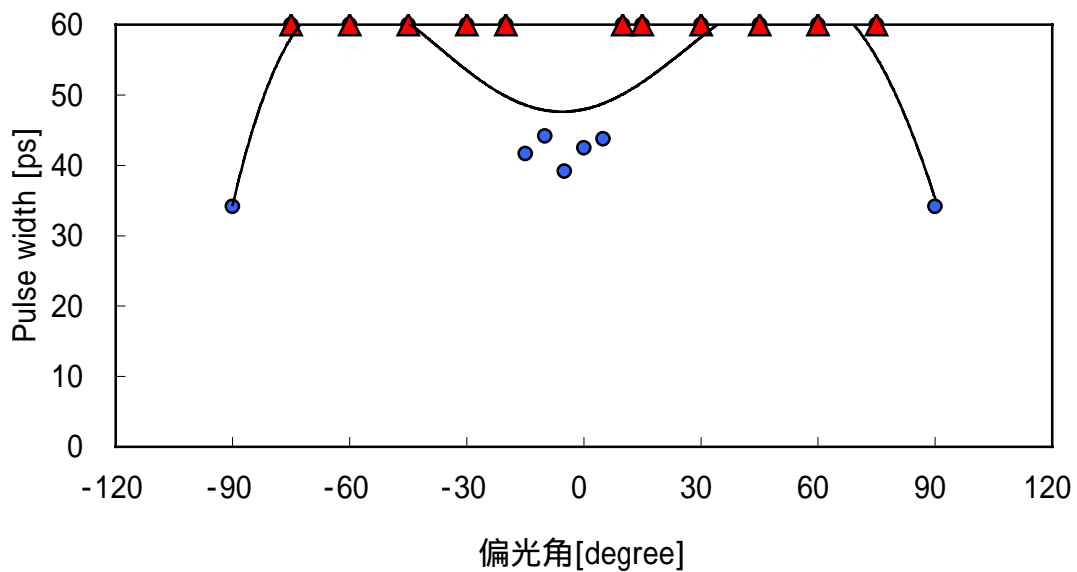


図 30：偏光角 - パルス幅 ($/2$)

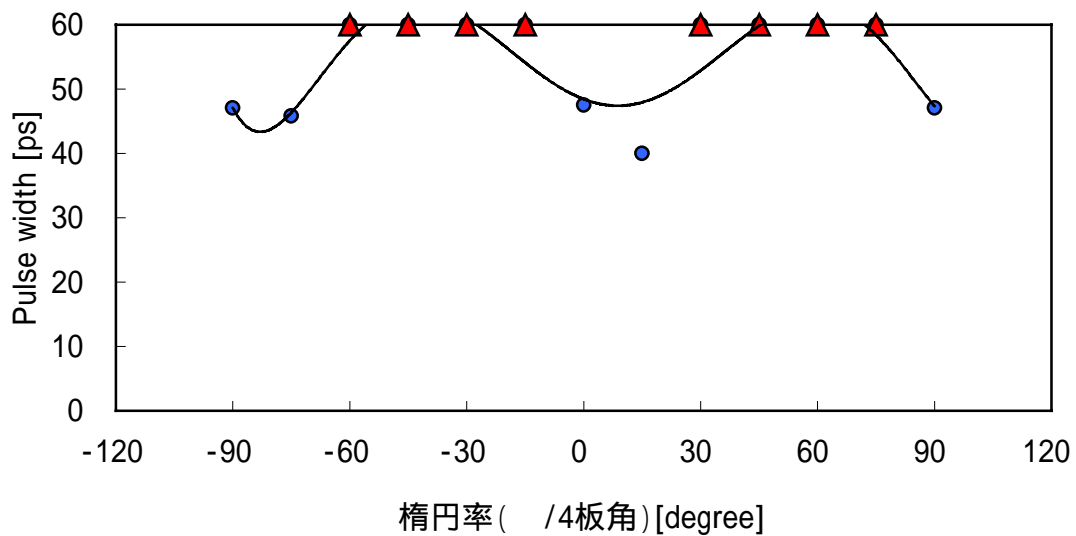


図 31：偏光角 - パルス幅 (λ/4)

偏光方向がパルス幅を保持する方向に働く範囲は、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 共に 30° 程度の範囲であった。

「3-2帰還タイミングが悪い場合」(抑圧効果が薄い)に行なった測定(図 22、図 23)でも、光パルスの後ろ側・立下り(右裾)の部分に自己光パルスが帰還している。

そのため、本実験では若干偏光方向の影響を受けている。しかし、パルス幅はほとんど変化がないため(図 22、図 23参照)偏光方向の影響はないと考えてよい。

帰還効果が全くない場合には、波形の変化はない(=偏光方向の影響は全くない)と考えられる。

図 30、図 31に示した結果から、偏光方向も帰還効果がある場合はジッタ抑圧に影響があるといえる。

帰還タイミング、偏光方向が最適な状態では、ジッタを $1/5$ に抑圧することに成功した。

3-4 パルス幅の測定

本素子を利得スイッチング法でパルス発振させる場合共鳴緩和周波数と同期した付近の変調周波数で細くなると予想される。ジッタの抑圧は実行パルス幅の減少に寄与する。変調周波数を固定した場合、パルス幅が帰還タイミングにより変化するかを測定したので、その結果を図 32に示す。この図と図 26を対応させると帰還パルスが最もジッタ抑圧するタイミングではパルス幅は細くなる。それ以外の部分ではパルス幅との規則性の関係ははっきりしなかった。

帰還タイミング及び偏光方向によって良好な場合 3 割程度パルス幅が細くなっている。現状のシステムでの一番細いパルス幅は約 30[ps]であった。

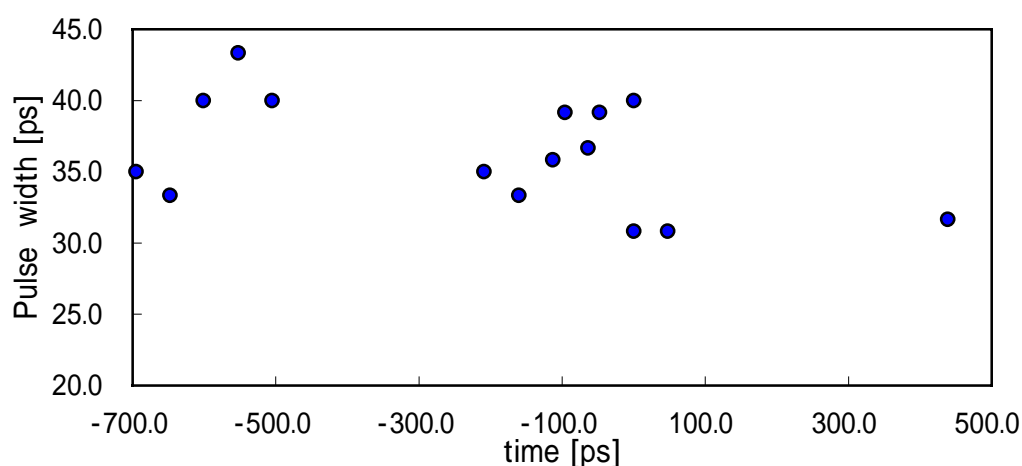


図 32 : 帰還タイミング - パルス幅

第4章 結論

4-1 まとめ

本研究で提案した利得スイッチング状態のLDから発生する光パルスのタイミングジッタ抑圧法は、十分に効果が確認できたといえる。また、ジッタ抑圧に効果の有る条件もほぼ特定することができた。

ジッタ抑圧効果の有る帰還タイミングの許容範囲は繰り返し周期の35[%]程度と比較的広い範囲であった。これは、装置化した際に、外環境の温度変化等の影響を受けてもジッタ抑圧効果の変動を $t < 3[\text{ps}]$ に抑えることが可能と考えられる。

帰還タイミングがパルス発振のどの位相にあたるかについての調査は、タイミング遅延の変化量を一定間隔にすることが困難だったが、繰り返し数周期分に当たる長いタイミング幅でジッタ抑圧の傾向を見るために、データ採取できたところを合成しグラフを作成した。その結果、一定周期で抑圧効果が増加していることが確認された。結果としてパルス品質改善に寄与する偏光マージンについては、 $1/2$ で25度、 $1/4$ で30度程度あった。また、パルス幅が良好な状態(細い)になる周期は90度ごとであった。

4-2 本研究の課題・展開

残された測定事項として帰還タイミングについては、もう少し細かく測定点を取る必要があると思う。今回の研究では、光ファイバの配線長を変化させることにより遅延時間を変化させて(=帰還タイミングを変化させる)いた。そのため、用意する光ファイバの長さの組み合わせに依存してしまいジッタ抑圧効果が少ないところや変化があるところなどが計測できず、詳細なグラフを作成できなかったからである。

その他、帰還光のパワー依存性については未調査のため、パワーによってジッタ抑圧条件に変化があると思われるが、今後の課題となってしまった。

本研究ではO-TDMに必要なシステム用パルス光研究全体のうち、基準光パルスのタイミングジッタを抑圧することを主目的として、図33に示す高品位短光パルス光システム構想のうちジッタ抑圧部のみ検討をした。

今後は今回の成果を踏まえ、関連する研究の展開として図33に示すシステムにて、パルス幅の圧縮、ドリフト抑圧を調査し、いっそう信頼性の高いパルスLD光源の研究に発展する予定である。

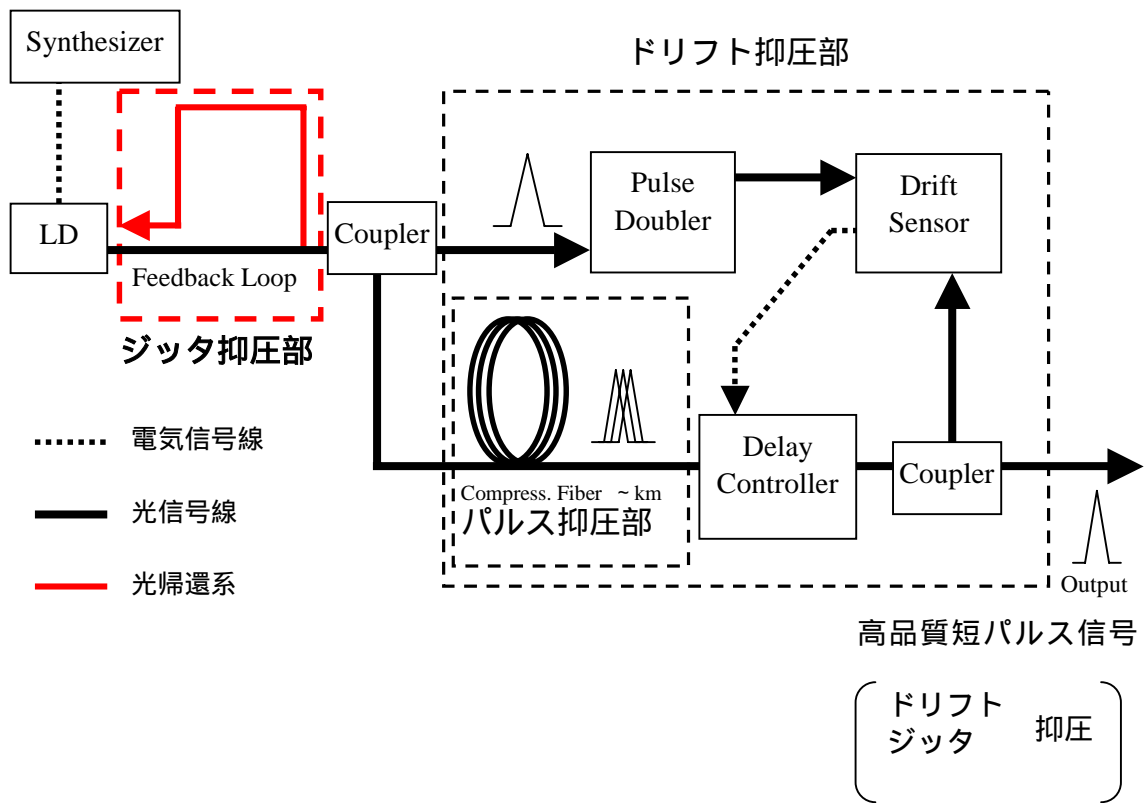


図 33 : 高性能光パルス生成システム全体

参考文献

- [1]野中ゼミ資料
- [2]雑誌 FUJITSU <http://magazine.fujitsu.com/>
- [3]羽鳥光俊 青山友紀 監修 小林郁太郎 編著
「光通信工学 2」 コロナ社 (1998)
- [4](株)テラテック 第3研究部
第58回応用物理学会学術講演会 講演予稿集 No.3 より
「利得スイッチング法を用いた光・光サンプリングシステムにおける
システムジッタの低減」
- [5](株)テラテック 第3研究部
CW 光注入による非線形ループミラーを用いた超短パルス光のジッタ低減
- [6]中野純史
卒業論文「光ファイバ通信におけるパルスのクロック安定化」
- [7]矢島達夫編 「超高速光技術」 丸善 (1990)
- [8]羽鳥光俊 青山友紀 監修 小林郁太郎 編著
「光通信工学 1」 コロナ社 (1998)
- [9]小西良弘 監 山本泉也著 「光ファイバ通信技術」 日刊工業新聞社 (1995)
- [10]末松安晴 伊賀健一 著 「光ファイバ通信入門[改訂3版]」 オーム社(1989)
- [11]応用物理学会 編 伊賀健一 編著 「半導体レーザ」 オーム社 (1994)
- [12]野中弘二
「1.5 ミクロン波長帯 MQW を用いた光横注入構造双安定レーザの研究」

謝辞

本研究及び論文をまとめるにあたり、多大なご指導を賜りました野中弘二助教授に感謝の意を表します。

本研究の場を与えていただき、ご指導賜りました神戸宏教授に心から感謝いたします。

原学科長をはじめご指導賜りました電子・光システム工学科の教員、職員の方にも重ねて御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり協力していただいた中野純史氏、浜田正典氏、木佐貫学氏、石川美津朗、鳥井智正、等工科大の同僚、社家一平様、高良秀彦様、他多くの方々に感謝いたします。